



平陆运河船闸通过能力研究

穆 森, 吕小龙

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 船闸通过能力是平陆运河开发的核心问题之一。基于货运量和过闸船型预测结果, 分析影响船闸通过能力的因素; 采用计算机模拟技术, 建立船舶进闸的排队仿真模型, 得出一次过闸平均吨位、一次过闸船舶数及闸室利用率 3 个关键参数, 据此分析并比较合理尺度下大、小船闸分工运行和双线船闸随机运行两种模式的船闸通过能力; 并在大、小船闸分工运行模式下, 对小闸通过能力与船舶载货量进行闭合调整。结果表明, 平陆运河须同时建设双线船闸, 当 1 000 吨级船舶艘次比较大时, 大、小船闸分工运行模式的船闸通过能力更大, 且远期部分 1 000 吨级船舶须从大闸通过才能使小闸通过能力满足运输需求。

关键词: 平陆运河; 船闸; 计算机仿真; 船闸通过能力

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0145-06

Lock capacity of the Pinglu Canal

MU Sen, LYU Xiao-long

(CCCC Water Transport Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The lock capacity is one of the core concerns for the Pinglu Canal. This paper analyzes the factors influencing the lock capacity. Through computer simulation, three main indicators, i.e. the average total tonnages per lockage, the average vessel number per lockage, and the occupancy rate of the lock chamber, are acquired, and according to which, the lock capacities of the two operation modes including separate operation of large and small locks with a reasonable scale and random operation of the double-lane lock are compared. Moreover, the lock capacity and ship's freight tonnage under the separate operation mode are adjusted. The result shows that double-lane locks shall be built at the same time, the separate mode provides a bigger capacity when the 1 000 DWT vessel accounts for a larger proportion, and some 1 000 DWT vessels have to pass through the big lock to ensure that the small lock's capacity meets the transport demand.

Keywords: the Pinglu Canal; lock; computer simulation; lock capacity

1 运河概况

平陆运河始于西江干流西津水库的沙坪河口, 溯沙坪河而上入钦州境, 跨分水岭沿旧州江而下至陆屋, 汇入钦江干流经钦州港入海, 是一条通江达海的水运通道。平陆运河地理位置及线路走

向见图 1。

平陆运河建成后将成为西部陆海新通道的重要组成部分, 也将成为珠西流域连接北部湾港的亿吨级水运交通大动脉, 其通过能力及闸室尺度论证极为重要。

收稿日期: 2020-06-05

作者简介: 穆森(1985—), 女, 高级工程师, 注册港航工程师, 注册咨询(投资)工程师, 从事水运工程设计工作。

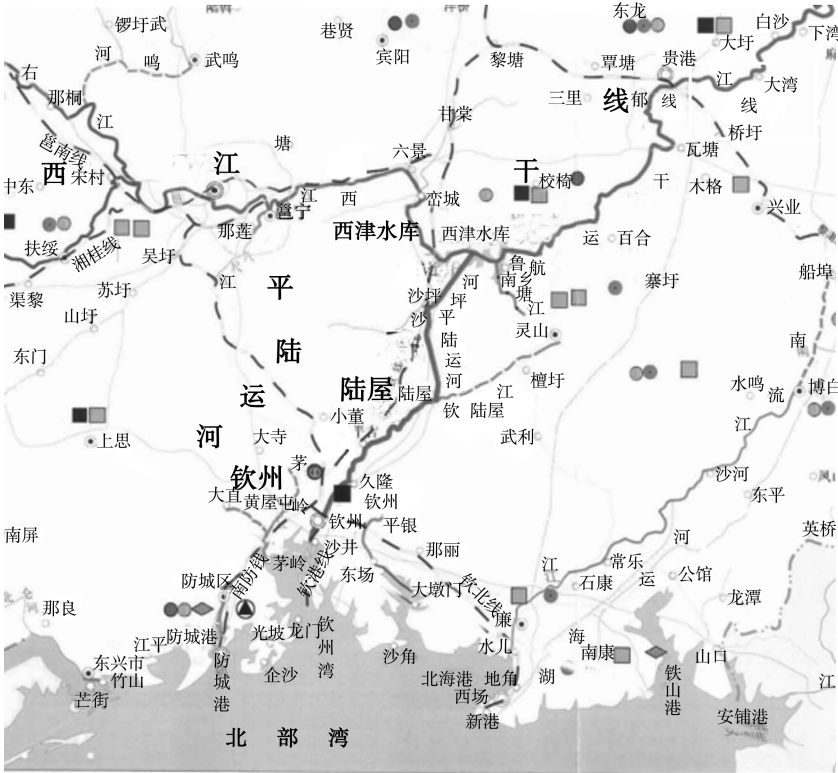


图 1 平陆运河地理位置

2 运量及过闸船型预测

2.1 运量

根据《平陆运河航运规划运量预测专题报告》(初稿)^[1]，平陆运河货运量及货源地分布预测分

别见表 1、2。由表 1 可知，随着平陆运河的建成，平陆运河货运量逐年增加，到 2050 年上行货运量达 5 330 万 t。

表 1 平陆运河货运量预测

万 t

2025 年			2035 年			2050 年		
上行	下行	合计	上行	下行	合计	上行	下行	合计
2 390	1 610	4 000	4 570	2 430	7 000	5 330	2 670	8 000

表 2 平陆运河货源地分布预测

货源地		货运量/万 t			主力船型(根据航道及船闸等级确定)
		2025 年	2035 年	2050 年	
南宁		550	840	970	近期 1 000~2 000 吨级，中远期 2 000~5 000 吨级
南宁以西	百色	1 480	2 010	2 130	1 000 吨级
	崇左	190	320	350	1 000 吨级
南宁以东	贵港	790	1 250	1 330	近期 2 000~5 000 吨级，中远期 3 000~5 000 吨级
	柳州	740	1 650	1 790	近期 2 000 吨级，中远期 2 000~5 000 吨级
	梧州	250	370	390	3 000~5 000 吨级
	贺州	—	500	510	1 000 吨级
其他		—	60	530	1 000~2 000 吨级
总计		4 000	7 000	8 000	

从表 2 可以看出,近期货运量主要来源于南宁及以西地区,占比 55% 以上;中期及远期南宁以东地区货运量占比增加,占比分别达到 54%、51%。运输的主力船型为 1 000 ~ 5 000 吨级货船,1 000 吨级货船主要承担来自南宁以西的百色、崇左等地区的货物运输。

2.2 过闸船型

平陆运河设计代表船型主尺度见表 3^[2-3]。

表 3 平陆运河设计代表船型				
船型	船长/m	船宽/m	满载吃水/m	备注
1 000 吨级货船	50	11.0	2.7	内河船型
2 000 吨级货船	74	14.0	3.5	内河船型
3 000 吨级货船	80	15.8	3.6	内河船型
5 000 吨级货船	90	15.8	5.0	内河船型

根据货源地分布及航道、船闸等级,确定平陆运河各水平年过闸船型及载质量比例(表 4)。

船型吨级	艘次比/%			载质量比/%		
	2025 年	2035 年	2050 年	2025 年	2035 年	2050 年
1 000 吨级货船	71.15	70.74	71.04	49.24	41.69	42.58
2 000 吨级货船	20.73	6.18	7.34	28.69	7.28	8.80
3 000 吨级货船	4.36	14.42	13.52	9.06	25.51	24.31
5 000 吨级货船	3.76	8.66	8.10	13.01	25.52	24.31
合计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注:本阶段对船型尺度取平均值,随着研究的深入,应根据实际情况对各吨级船型尺度进行细分。

从表 4 可以看出,各水平年 1 000 吨级货船为主力船型,艘次比变化不大,均在 70% 以上,载质量比在 41%~50%。

3 船闸通过能力计算

根据运量与船型预测中间成果可知,1 000 t 船舶占比较大。为分析船闸有效尺度对船闸通过能力的影响,考虑以下 2 种运行模式。

- 1)不同吨级船舶混合过闸——双线船闸随机运行(300 m×34 m+300 m×34 m);
- 2)1 000 吨级及以上船舶分别通过专用船闸过闸——大、小船闸分工运行(300 m×34 m+230 m×23 m)。

3.1 闸室平面尺度拟定

船闸闸室宽度应符合船闸有效宽度系列^[4]。船闸闸室宽度一般是标准船型的倍数,结合已有工程经验并考虑未来船型大型化趋势,平陆运河闸室分别考虑 34 m 宽和 23 m 宽的方案,其中 34 m 宽闸室可横向排列 3 艘 1 000 吨级货船或 2 艘 5 000 吨级货船,23 m 宽闸室最大可横向排列 2 艘 1 000 吨级货船。闸室长度均取 300 m,此时最大可纵向排列 3 艘 5 000 吨级内河货船或 4 艘 1 000 吨级

内河货船。

3.2 船闸一次过闸平均吨位

由于船舶尺度的离散性和船舶到闸的随机性,对于不同的闸室尺度,船舶组成与平均船舶过闸吨位和过闸时间之间既不存在解析解,也不存在数值解,只能通过仿真试验得到统计意义上的定量关系。本次研究采用计算机模拟技术,建立船舶进闸的排队仿真模型,采用“二维装箱”算法,将闸室视为一个大的矩形,将船舶视为小矩形,将船舶放入闸室的过程看作是用小矩形填充大矩形的过程(图 2)。

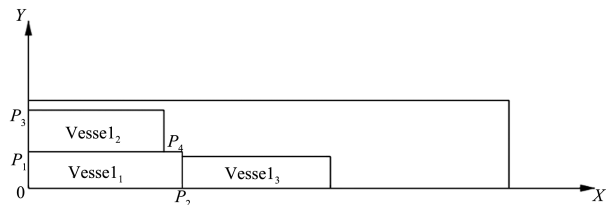


图 2 装箱算法

用 $Vesseli$ 代表第 i 艘船舶,其长、宽分别是 $Vesseli.Length$ 和 $Vesseli.Width$,船舶 i 在闸室中的左下角坐标为 $(Vesseli.X, Vesseli.Y)$,并用 $Locki.Length$ 表示第 i 个船闸的设计船队长度,并用 $Locki.Width$ 表示第 i 个船闸的设计船队宽度。

船舶能够放入闸室，须满足下述条件：

1) 小矩形的边界不能超出大矩形的边界。

$Vesseli.X \geqslant 0$ 且 $Vesseli.Y \geqslant 0$ 且 $Vesseli.X + Vesseli.Length \leqslant Locki.Length$ 且 $Vesseli.Y + Vesseli.Width \leqslant Locki.Width$

2) 小矩形之间不互相重叠。

$Vesselj$ 是闸室中已排船舶 $Vesseli$ 外的任意一艘船舶，判断 $Vesseli$ 能否放入闸室的约束条件如下：

$VesseliX + Vesseli.Length \leqslant Vesselj.X$ 或 $Vesseli.X \geqslant Vesselj.X + Vesselj.Length$ 或 $Vesseli.Y + Vesseli.Width \leqslant Vesselj.Y$ 或 $Vesseli.Y \geqslant Vesselj.Y + Vesselj.Width$

在满足上述条件的前提下，经过大量、反复模拟试验和统计分析，获得一次过闸平均吨位、一次过闸平均船舶数及闸室利用率^[5-6]。2 种运行模式下仿真计算结果见表 5。

表 5 2 种运行模式下仿真计算结果

设计 水平年	大、小船闸 (300 m×34 m+230 m×23 m) 分工运行						双线船闸 (300 m×34 m+300 m×34 m) 随机运行		
	230 m×23 m 船闸			300 m×34 m 船闸			300 m×34 m 船闸		
	一次过闸平均吨位/t	闸室平均利用率/%	一闸次平均船舶数/艘	一次过闸平均吨位/t	闸室平均利用率/%	一闸次平均船舶数/艘	一次过闸平均吨位/t	闸室平均利用率/%	一闸次平均船舶数/艘
2025				15 200	70.69		15 793	82.10	10.91
2035	8 000	90.91	8	20 251	79.64	6	17 920	84.38	10.56
2050				19 812	78.91		17 718	84.23	10.62

3.3 船舶一次过闸时间

船舶过闸时间分别计算，结果见表 6。

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》，对

表 6 各水平年不同运行模式下一次过闸时间计算结果

运行模式	闸门开启时间 t_1/min	进闸航速 平均值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	进闸 航行 距离 (m)	单向船 队进闸 时间 t_2/min	灌泄水 时间 t_3/min	出闸航速 平均值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	出闸 航行 距离/ m	单向船 队出闸 时间 t_4/min	进、出 闸间隔 时间 t_5/min	双向一 次过闸 时间 T_1/min	单向一次过 闸时间(全 部按双向考 虑) T_2/min
分工 2025 年											
运行 2035 年	4	0.8	442	9.21	12	1.2	442	6.14	14.00	126.69	63.35
小闸 2050 年											
分工 2025 年											
运行 2035 年	4	0.8	580	12.08	12	1.2	580	8.06	10.00	120.28	60.14
大闸 2050 年											
随机 2025 年									19.82	163.56	81.78
运行 2035 年	4	0.8	580	12.08	14	1.2	580	8.06	19.12	160.76	80.38
2050 年									19.24	161.24	80.62

注： $T_1 = 4t_1 + 2t_2' + 2t_3 + 2t_4' + 4t_5$ ， $T_2 = \frac{1}{2}T_1$ ， t_2' 和 t_4' 为别为双向过闸船队进、出时间。因单向和双向过闸随机分布，默认按双向过闸考虑，即 $t_2' = t_2$ 、 $t_4' = t_4$ 。

特别说明的是：

1) 对于分工运行模式，双线船闸采用独立输水系统，参考我国类似规模船闸的设计经验，每个闸次灌泄水时间约 12 min^[7]；对于随机运行模式，双线船闸采用互灌互泄输水系统，输水时间约 14 min^[8]。

2) 引航道采用“曲进直出”的进、出闸方式，进出闸距离小闸为 442 m，大闸为 580 m，设计代

表船型均为机动船，进闸速度取 0.8 m/s，出闸速度取 1.2 m/s。

3) 考虑平陆运河建成后船舶通过量大，故全部按双向过闸考虑。

3.4 年通航天数

减去检修、气候、水位等影响通航的天数，结合西江各船闸实际通航时间，船闸年通航天数

按 340 d 计算。

3.5 船舶装载系数 α 和运量不均匀系数 β

船舶装载系数 α 与货物种类、流向和批量有关, 根据长洲三、四线船闸统计资料^[9], 考虑平陆运河货种以煤炭、矿建及集装箱为主, 取 0.8。

根据桂平船闸统计资料, β 约为 1.25^[10], 同时考虑 5 000 t 船舶直达运输受西江季节性变化明显, 故取 1.1。

3.6 船闸通过能力

各运行模式下船闸通过能力见表 7。

表 7 船闸通过能力计算结果

设计 水平年	大、小船闸(300 m×34 m+230 m×23 m)分工运行					双线船闸(300 m×34 m+300 m×34 m)随机运行		
	230 m×23 m 船闸		300 m×34 m 船闸		两线船闸通 过能力合计/ 万 t	300 m×34 m 船闸		两线船闸通 过能力合计/ 万 t
	船闸日平均 过闸次数 <i>n</i> /次	船闸单向年 过闸能力 <i>P</i> ₂ /万 t	船闸日平均 过闸次数 <i>n</i> /次	船闸单向年 过闸能力 <i>P</i> ₂ /万 t		船闸日平均 过闸次数 <i>n</i> /次	船闸单向年 过闸能力 <i>P</i> ₂ /万 t	
2025	20.84	2 061	21.95	4 125	6 186	16.14	3 152	6 303
2035	20.84	2 061	21.95	5 496	7 557	16.42	3 638	7 277
2050	20.84	2 061	21.95	5 376	7 437	16.37	3 587	7 173

4 通过能力分析

4.1 初步对比分析

根据货运量预测, 结合本工程计算, 2 种运行方式船闸通过能力与运量预测对比见表 8。

从表 8 可以看出:

1) 预测单向过闸货运量分别为 2 390、4 570、5 330 万 t, 大、小船闸分工运行和双线船闸随机运行 2 种方式各水平年的通过能力均能满足过闸

货运量要求。

2) 在大、小闸分工运行模式下, 远期 2050 年 1 000 吨级船舶载货量(2 270 万 t)超过小闸的通过能力(2 061 万 t), 故需有部分 1 000 吨级货船从大闸通过, 从而使大闸通过能力下降。因此需要对 2050 年通过大闸的艘次比进行调整, 并重新测算大闸的通过能力。

表 8 各线船闸通过能力与运量预测

设计水平年	大、小船闸分工运行			双线船闸随机运行		不同吨级船舶		
	230 m×23 m 船闸	300 m×34 m 船闸	合计	单线船闸	双线合计	1 000 吨级 (按照载质量比)	2 000~5 000 吨级 (按照载质量比)	合计
2025	2 061	4 125	6 186	3 152	6 303	1 177	1 213	2 390
2035	2 061	5 496	7 557	3 638	7 277	1 905	2 665	4 570
2050	2 061	5 376	7 437	3 587	7 173	2 270	3 060	5 330

4.2 大闸通过能力调整

从表 8 可知, 到远期 2050 年, 1 000 吨级货船需要运输 209 万 t 的货物从大闸通过, 换算成 1 000 吨级船舶数量为 2 090 艘, 据此调整大闸过闸船舶的艘次比, 调整结果见表 9。

表 9 大闸调整后的船型比例

船型	船长/m	船宽/m	艘次比/%		
			2025 年	2035 年	2050 年
1 000 吨级货船	50	11.0	0.00	0.00	12.94
2 000 吨级货船	74	14.0	71.87	21.13	22.06
3 000 吨级货船	80	15.8	15.11	49.30	40.62
5 000 吨级货船	90	15.8	13.02	29.58	24.37

4.3 通过能力与运量预测对比

调整后各模式下船闸通过能力与运量预测对比见表 10。

从表 10 可以看出:

1) 大、小船闸分工运行方式经过调整后, 即近中期大闸仅通过 2 000 ~5 000 吨级货船, 2050 年大闸通过部分 1 000 吨级货船, 大、小船闸的通过能力均满足该闸分工通过船型的载货量。

2) 在双线船闸随机运行模式下, 中远期单线船闸通过能力均小于相应预测货运量, 无法满足通航需求, 因此须考虑一次性同时建设双线船闸。

3) 由于 1 000 吨级船舶占比大, 除近期 2025 年外, 2035、2050 年大小船闸分工运行方式的通过能力均比双线船闸随机运行方式大。

本阶段通过能力计算中船型尺度取的是平均值, 随着研究的深入, 应根据实际情况对各吨级船型尺度进行细分。

表 10 调整后各线船闸通过能力与运量预测								万 t
设计 水平年	大、小船闸分工运行			双线船闸随机运行		不同吨级船舶		
	230 m×23 m 船闸	300 m×34 m 船闸	合计	单线船闸	双线合计	1 000 吨级 (按照载质量比)	2 000~5 000 吨级 (按照载质量比)	合计
2025	2 061	4 125	6 186	3 152	6 303	1 177	1 213	2 390
2035	2 061	5 496	7 557	3 638	7 277	1 905	2 665	4 570
2050	2 061	5 212	7 273	3 587	7 173	2 061	3 269	5 330

5 结语

1) 无论大、小船闸分工运行模式还是双线船闸随机运行模式, 平陆运河须同时建设双线船闸才能满足各水平年货运需求。

2) 由于 1 000 吨级船舶占比大, 除近期 2025 年外, 2035 和 2050 年大、小船闸分工运行方式的通过能力均比双线船闸随机运行方式略高。可综合考虑建设投资、运营管理、水资源综合利用等多方面因素, 确定平陆运河船闸的建设规模。

3) 建设双线船闸, 可通过必要的管理手段如联合调度等方式, 进一步提高过闸能力。

4) 船型比例是影响平陆运河船闸通过能力的最重要因素, 预测合理的船型比例, 对确定合理的船闸建设规模至关重要。下阶段应结合完善的运量预测与航运发展规划, 进一步深化船型比例分析, 并就此完善平陆运河船闸建设规模。

司, 2020.

[2] 武汉长江船舶设计院有限公司.内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列第 3 部分: 西江航运干线: GB 38030.3—2019[S].北京: 中国质检出版社, 2019.

[3] 武汉理工大学.内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列第 4 部分: 珠江三线: GB 38030.4—2019[S].北京: 中国质检出版社, 2019.

[4] 长江航道局.内河通航标准: GB 50139—2014[S].北京: 中国计划出版社, 2014

[5] 商剑平, 吴澎, 唐颖.基于计算机仿真的船闸联合调度方案研究[J].水运工程, 2011(9): 199-204.

[6] 袁和平, 刘春泽, 张婧姝.京杭运河台儿庄三线船闸通过能力及闸室尺度[J].水运工程, 2016(10): 169-173.

[7] 曹凤帅, 吴澎.闸底长廊道输水系统研究[J].水运工程, 2019(1): 98-111.

[8] 严振石, 李君, 宣国祥, 等.适应通过能力发展需求的多线船闸输水系统设计与应用[J].水运工程, 2020(1): 70-73.

[9] 韦巨球, 赖子机, 唐琨.船闸通过能力计算系数研究[J].水运工程, 2006(1): 59-62.

[10] 庞雪松, 潘荣友, 廖鹏.提高长洲枢纽现有船闸通过能力对策研究[J].水运工程, 2011(4): 114-119, 125.

(本文编辑 郭雪珍)

参考文献:

[1] 国家发展和改革委员会综合运输研究所, 中交水运规划设计院有限公司.平陆运河航运规划运量预测专题报告(初稿) [R].北京: 中交水运规划设计院有限公

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www. sygc. com. cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部